Abschlussbericht

Forschungs- und Entwicklungsförderung KMU

„Entwicklung eines Trainingssimulators für Gabelstapler und Flurförderzeuge mit professionellem Logistikmanagement“

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Ministeriums für Wirtschaft und Europaangelegenheiten des Landes Brandenburg und der EU gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

Antragsnummer:	80148996
Antrag vom:	27.06.2011
Zuwendungsbescheid vom:	4. April 2012
Durchführungszeitraum:	01.09.2011 bis 31.08.2014
Antragsteller:	bestsim GmbH Karlstraße 9 19348 Perleberg

bestsim
SIMULATOREN & EVENTS

Inhaltsregister

1. Aufgabenstellung..... 3

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 4

3. Planung und Ablauf des Vorhabens..... 6

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde..... 31

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen 31

1. Aufgabenstellung

In der neuen Projektidee geht es um die Entwicklung eines modularen Bewegungssimulators zu Trainingszwecken in großen Logistikunternehmen und Fahrschulen für Gabelstapler und Flurförderzeuge. Der neue Trainingssimulator soll durch seinen realitätsnahen Stapleraufbau inklusive Bedienelementen speziell auf die Bedürfnisse der praktischen Gabelstaplerausbildung zugeschnitten sein. Insbesondere der Betrieb von Flurförderzeugen in großen Unternehmen mit hohen Waren- und Verkehrsaufkommen soll am Simulator trainiert werden. Neben der Bedienung des Fahrzeugs soll das Training die situativen Besonderheiten in modernen Logistikzentren darstellen unter Einbeziehung von Waren- und Behältermanagement. Dargestellt werden neben klassischen Gabelstaplern auch Spezialstapler wie Gassenfahrzeuge und Schubmastfahrzeuge.

Die Ausbildung am Trainingssimulator wird im Gegensatz zum praktischen Fahren im betrieblichen Umfeld einen größeren Bewegungsspielraum, speziell im Hinblick auf Grenzwerte, abdecken. Gleichzeitig werden die Risiken zur Gefährdung der Auszubildenden reduziert, da am Simulator ein zu vernachlässigendes Gefahrenpotential besteht. Hinzu kommt, dass durch die Ausbildung am Simulator zukünftig die betrieblichen Ressourcen in den betreffenden Unternehmen weniger belastet werden, da die Bereitstellung von Staplern und Räumlichkeiten zu Übungszwecken entfällt. Aus den genannten Gründen soll sich der neue Simulator für die direkte Ergänzung zu der theoretischen Wissensvermittlung im Ausbildungsprozess eignen.

Im Vordergrund der Projektidee steht die Entwicklung einer geeigneten Modulbauweise für die neue Soft- und Hardware.

Entwicklungsziele Software:

- Softwareseitige Entwicklung in Form einer realitätsnahen Darstellung von verschiedenen realen Szenarien wie z.B.
    - Be- und Entladung von LKW, Containern, Transportzügen, Förderbändern
    - Umgang mit modernen Lagersystemen wie z.B. Kippgestellen, Hochregallager
    - Umgang mit Ablaufmanagementsystemen, Verkehrsmanagement, Behältermanagement
    - Verhalten in Gefahrensituationen (wichtig!)
    - Rampenfahrten
- Darstellung verschiedener Arten von Gabelstaplern und Flurförderzeugen wie z.B. Gabelstapler, Gassenfahrzeugen, Schubmastfahrzeugen, etc.
- Umsetzung einer absolut realitätsnahen Physikdarstellung sowie der Leistungsmessung und Auswertung der absolvierten Trainingseinheiten inklusive Bewertungssystem

Entwicklungsziele Hardware:

- Adaption von realen Fahrzeugen, die sich in Haptik und Optik nicht unterscheiden
- Austauschbarkeit der Bedienelemente je nach Fahrzeugtyp
- Änderung der Sitzposition je nach Fahrzeug
- Entwicklung eines geeigneten Projektionssystems (Kuppel-/Halbkuppelprojektion)
- Umsetzung eines geeigneten Bewegungssystems mit haptischer Rückmeldung bei Gabelkontakten
- Konstruktion und Fertigung einer geeigneten rotierenden Plattform für die Gesamtkonstruktion mit besonderem Fokus auf Zerlegbarkeit und Leichtbau (Eignung zum Einbau in Büro-/Schulungsräume)
- Integration eines geeigneten Audiosystems
- Umsetzung eines hohen Sicherheitsstandards, Herstellerzertifizierung, Performance-Level-Analyse, Betrieb mit 220V/16A

Die Bestsim GmbH will mit der Aufnahme der Entwicklungsarbeiten auf den Marktbedarf reagieren und eine bestehende Marktlücke schließen. Mithilfe der Neuentwicklung will das Unternehmen seine Produktpalette um ein wettbewerbsfähiges Produkt erweitern und langfristig neue Absatzmärkte erschließen.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Ausgehend von unserer aktuellen Marktposition und bestärkt durch aktive Nachfragen unserer Kunden sehen wir eine Vielzahl neuer Anwendungsbereiche des neuen Simulators sowie des Projektionssystems sowohl in Ausbildungseinrichtungen als auch in Unternehmen, die stark mit logistischen Prozessen verbunden sind.

Da aktuell kein Wettbewerber eine vergleichbare, innovative Lösung zur praktischen Schulung und Ausbildung der Mitarbeiter ohne gleichzeitige Beeinträchtigung der innerbetrieblichen Abläufe bzw. Fahrzeugkapazitäten bietet, erwartet Bestsim eine anziehende Nachfrage, sowohl national, als auch international.

Die Bestsim GmbH entwickelt und produziert seit einigen Jahren zum Verkauf oder zur Vermietung bestimmte Fahrsimulatoren. Als professioneller Partner berät und unterstützt das Unternehmen Bestsim seine Kunden von der Idee bis zur Umsetzung.

Im Rahmen eines ZIM-SOLO-Projekts entwickelte die Bestsim GmbH bereits einen Fahrsimulator mit innovativer realer Kräftesimulation. Er verfügt über ein voll-haptisches Cockpit, das die Kräfte „hautnah" überträgt. Unterstützt wird die Kräftesimulation durch eine sechsachsige elektrische Bewegungsplattform, auf die das Cockpit aufgebaut ist. Damit soll der ständig wachsende Kundenwunsch nach möglichst realistischen Simulationen erfüllt werden.

Herr Seefried als Geschäftsführer, wie auch die am Projekt beteiligten Mitarbeiter, verfügen über eine fachliche Ausbildung bzw. Studium sowie mehrjährige Erfahrungen in der Entwicklung und Konstruktion von Fahrsimulatoren.

Externe Partner, wie die Jungheinrich AG und die STILL GmbH unterstützen Bestsim bei der Entwicklung der Fahrsimulation für Flurförderzeuge. Die Trainingsmodule zu innerbetrieblichen Abläufen können in Zusammenarbeit mit der Werkslogistik von Volkswagen in Wolfsburg erarbeitet werden.

Kurzvorstellung Jungheinrich AG:

Jungheinrich AG
Am Stadtrand 35
22047 Hamburg

Vertreten durch den Vorstand:
Hans-Georg Frey (Vorsitzender des Vorstandes),
Dr. Lars Brzoska, Dr. Volker Hues, Dr. Klaus-Dieter Rosenbach

Den Grundstein für das Unternehmen legte Dr. Friedrich Jungheinrich am 7. August 1953 mit der Gründung der „H. Jungheinrich & Co. Maschinenfabrik" in Hamburg. Was damals in einer kleinen Werkstatt im Stadtteil Barmbek mit dreißig Mitarbeitern begann, entwickelte sich im Laufe der vergangenen Jahrzehnte zu einem global operierenden Konzern mit 11.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie einem Jahresumsatz von über zwei Milliarden Euro (2012). Jungheinrich gehört damit weltweit zu den Top 3 in den Bereichen Flurförderzeug-, Lager- und Materialflusstechnik.

Kurzvorstellung STILL GmbH
STILL GmbH
Berzeliusstraße 10
D-22113 Hamburg

Geschäftsführer:

Bert-Jan Knoef (Vorsitzender)
Thomas A. Fischer
Goran Mihajlovic
Olaf Schulz

Was Firmengründer Hans Still 1920 mit viel Kreativität, Unternehmergeist und Qualität auf den Weg brachte, entwickelte sich zum führenden Anbieter für die intelligente Steuerung von Intralogistik.

Heute sind allein in Europa mehr als 6.000 qualifizierte Mitarbeiter aus Forschung und Entwicklung, Produktion, Vertrieb und Service daran beteiligt, die Anforderungen der Kunden überall auf der Welt zu erfüllen.

Der Schlüssel für den Unternehmenserfolg sind hocheffiziente Produkte, die von branchenspezifischen Komplettangeboten für große und kleine Betriebe bis zu computergestützten Logistik-Programmen für effektives Lager- und Materialflussmanagement reichen.

Kurzvorstellung Volkswagen AG

Vorsitzender des Aufsichtsrates:
Ferdinand K. Piëch

Vorsitzender des Vorstands:
Martin Winterkorn

Postanschrift: Berliner Ring 2, 38440 Wolfsburg

Der Volkswagen Konzern mit Sitz in Wolfsburg ist einer der führenden Automobilhersteller weltweit und der größte Automobilproduzent Europas. Im Jahr 2013 steigerte der Konzern die Auslieferungen von Fahrzeugen an Kunden auf 9,731 Millionen (2012: 9,276 Millionen), das entspricht einem Pkw-Weltmarktanteil von 12,8 Prozent.

Zwölf Marken aus sieben europäischen Ländern gehören zum Konzern: Volkswagen Pkw, Audi, SEAT, ŠKODA, Bentley, Bugatti, Lamborghini, Porsche, Ducati, Volkswagen Nutzfahrzeuge, Scania und MAN.

In weiteren Geschäftsfeldern werden im Volkswagen Konzern Großdieselmotoren für maritime und stationäre Anwendungen (schlüsselfertige Kraftwerke), Turbolader, Turbomaschinen (Dampf- und Gasturbinen), Kompressoren und chemische Reaktoren hergestellt. Des Weiteren werden Spezialgetriebe für Fahrzeuge und Windräder, Gleitlager und Kupplungen sowie Prüfzentren für den Mobilitätssektor produziert.

Der Konzern betreibt in 19 Ländern Europas und in acht Ländern Amerikas, Asiens und Afrikas 106 Fertigungsstätten. 572.800 Beschäftigte produzieren an jedem Arbeitstag rund um den Globus circa 39.350 Fahrzeuge, sind mit fahrzeugbezogenen Dienstleistungen befasst oder arbeiten in weiteren Geschäftsfeldern. Seine Fahrzeuge bietet der Volkswagen Konzern in 153 Ländern an.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Projektlaufzeit laut Zuwendungsbescheid vom 4.4.2012: 1.9.2011- 28.2.2014

Aufgrund von Verzögerungen innerhalb der Projektbearbeitung konnte Bestsim die geplanten Mittel für das Haushaltsjahr 2013 nicht komplett abrufen und beantragte am 17.5.2013 eine Verschiebung von 72.000,00 € in das Jahr 2014. Dem Antrag wurde mit Änderungsbescheid vom 18.6.2013 zugestimmt.
Eine kostenneutrale Projektverlängerung, aufgrund von wesentlich umfangreicher Arbeit an der Software, wurde am 30.10.2013 beantragt. Diesem Antrag folgte ein positiver Bescheid der ILB vom 28.1.2014. Die Projektlaufzeit verlängerte sich somit bis zum 31.8.2014.

Am 13.3.2014 wurde von Bestsim eine kostenneutrale Umwidmung in Höhe von 100.000,00 € aus der Position „Materialausgaben“ in die Position „sonstige direkte Ausgaben“ beantragt. Die Umwidmung begründete sich aus zeitlichen sowie personellen Engpässen innerhalb des Projektes. Der positive Änderungsbescheid ist datiert vom 29.4.2014.

Während des Projektes stellte sich heraus, dass der Umfang einiger softwareseitiger Arbeitspakete wesentlich umfassender ist, als anfangs gedacht. Hier war ein verstärkter Personaleinsatz erforderlich. Mit Herrn Zart verließ außerdem der Hauptprogrammierer zum 31.10.13 unser Unternehmen. Als Ersatz für Herrn Zart wurde Herr Floum in das Projekt involviert. Herr Zart blieb Bestsim jedoch bis zum Projektende auf Teilzeitbasis erhalten. Aus den genannten Gründen konnte das FuE-Projekt nicht bis zum 28.02.2014 in dem von uns geplanten Umfang erfolgreich abgeschlossen werden, weshalb eine kostenneutrale Projektverlängerung um 6 Monate beantragt wurde. Mit dem Änderungsbescheid vom 28.01.2014 wurde unserem Anliegen entsprochen. Der Projektzeitraum endete somit zum 31.08.2014.

Die einzelnen Arbeitsschritte wurden wie folgt durchgeführt:

Recherche und Planungsphase

Im Vorfeld des Projektes und im Zuge der Recherche hat die Bestsim GmbH frühzeitig Kontakt zu namhaften Herstellern von Flurförderzeugen aufgenommen, insbesondere sind hier zu nennen:

Still GmbH, Hamburg
Jungheinrich AG, Hamburg
Jungheinrich AG, Sonderbauwerk Lüneburg

In Zusammenarbeit mit diesen Unternehmen wurden Kosten, Nachhaltigkeit und Anwendbarkeit von virtuellen Trainings diskutiert und es gab einen ausgiebigen Technologie- und Informationstransfer.

Weiterhin wurden Fahrzeuge ausgewählt, die im deutschlandweiten Vergleich am häufigsten eingesetzt werden, um die Simulation auf die Zielgruppe anzupassen und diese so groß wie möglich zu wählen.

- Jungheinrich AG: hier Fokussierung auf Gegengewichtsstapler der Modellserie „EFG“ , Schlepper der Serie „EZS“
- Still GmbH: hier Fokussierung auf Gegengewichtsstapler Modell „Still RX“

Im Gegensatz zum ursprünglichen Antrag entschieden wir uns das Modul „Schubmastfahrzeug“ durch das Modul „Schlepper/Routenzug“ zu ersetzen.

Da sich die Module Frontstapler und Schubmaststapler (ursprünglich geplant) sehr ähneln und in immer mehr Logistikzentren sogenannte Schlepper oder Routenzüge zum Einsatz kommen, entschieden wir uns das Modul Schubmaststapler durch das Modul Routenzug zu ersetzen. Durch diese Entscheidung konnten wir die Zielgruppe erweitern und vor Allem darstellen, dass der Simulator nicht auf Stapler oder ähnliche Fahrzeuge beschränkt ist.

Als weitere Partner und Informationslieferanten stellten sich die „Lernwerkstatt Logistik“ sowie die Flurförderzeug-Fahrschule im Volkswagen-Werk Wolfsburg zur Verfügung. Gemeinsam wurde auf Basis sämtlicher Informationen und Recherchen ein erstes Konzept für das virtuelle Training am Simulator erstellt.

- Analyse von Modelllinien und entsprechenden potentiellen Trainingsabläufen
- Sammlung von Material für Entwürfe erster Szenario Zusammenstellungen
- Sichtung der Anforderungen bei Logistikunternehmen/Firmen mit hohem internen logisti schen Aufwand und Lagertätigkeiten unter Einsatz von Flurförderzeugen
- Kernanforderung: Modularität zur Schulung auf Vielzahl verschiedener Geräte/Modelle ohne Störung laufender Betriebsprozesse bzw. Herauslösung aus praktischen Betriebsabläufen

Als Fazit der Recherchen haben wir festgestellt, dass potentielle Kunden besonderen Wert auf folgende Merkmale legen:

Kostenreduktion, Nachhaltigkeit, Abbildung authentischer Arbeitsumgebungen,
Realitätsnähe, Erweiterbarkeit, Arbeitssicherheit und Arbeitsschutz.
Reduzierung der Unfallzahlen und Schadensminimierung, Wiederholbarkeit, Transparenz

Recherche zu Aktuatoren in der Industrie, Analyse der technischen Parameter (z.B.: Genauigkeit, Geschwindigkeit, Energiebedarf, etc.)

In der Steuer- und Regelungstechnik bezeichnen Aktuatoren das signalwandlerbezogene Gegenstück zu Sensoren und bilden die Stellglieder in einem Regelkreis. Sie setzen Signale einer Regelung in (meist) mechanische Arbeit um. Ein Beispiel ist das Öffnen und Schließen eines Ventils.
In der Robotik wird oft auch der Begriff Effektor gleichbedeutend für Aktor verwendet. Effektoren dienen dem Roboter z. B. zum Ergreifen und Bearbeiten von Gegenständen und erzeugen so einen Effekt.

In Teilgebieten der Mechatronik, wie z. B. der Lineartechnik, finden elektromechanische Antriebe wie z. B. Hub- und Verstellsysteme ihren Einsatz, die im Allgemeinen auch als Aktuatoren bezeichnet werden. Auch der Schreib/Lese-Kopf (Schrittmotor) einer Festplatte oder der ausgleichende Wagen bei einem stehenden Pendel wird als Aktuator bezeichnet. Die Steuerung erfolgt in aller Regel in einem offenen oder geschlossenen Regelkreis.

Aktuator Prinzipien:

induktiv arbeitende Elektromotoren
Bimetall-Aktuatoren
Hydraulik- oder Pneumatik-Aktuatoren
Zylinder
Elektrochemische Aktuatoren
Elektromechanische Aktuatoren
Piezoaktor
Magnetostriktiver Aktuator
Rheologischer Aktuator
Formgedächtnislegierungen
Elektroaktive Polymer Aktuatoren

Aus dem Bereich der „Neuen Materialien“ stammen Aktuatoren die auf Änderungen bestimmter Umgebungsgrößen mit definierten Aktuatorwirkungen reagieren. Sie ersetzen damit elektrische Regelstrecken durch ein einziges Element. Aktuatoren auf Basis von Formgedächtnis-Legierungen und Dehnstoffelementen sind temperatursensitiv und kommen beispielsweise in Temperaturreglern zum Einsatz. Smarte Hydrogele werden unter anderem für Chemostate verwendet, die pH-Wert, Ionen- oder Stoffkonzentrationen automatisch regulieren.

Im Gegensatz zu pneumatischen und hydraulischen Aktuatoren bieten elektromechanische Aktuatoren im Großteil ihrer Anwendungen beträchtliche Energieeinsparungen, da sie nur dann Energie verbrauchen, wenn sie tatsächlich Arbeiten ausführen. Die Kugelgewindespindel und die Walzengewinde, welche in elektromechanischen Aktuatoren verwendet werden, bieten hohe Wirkungsgrade, üblicherweise im Bereich von 90%.

Lineare Aktuatoren werden häufiger bei Anwendungen verwendet, welche einen sauberen Betrieb erfordern, z. B. in der Lebensmittel-, Getränke-, Verpackungs-, Medizinal- und Elektronikherstellungsindustrie. Werden hydraulische Aktuatoren verwendet, so können Undichtigkeiten und das Entsorgen des verwendeten Öls ein Problem darstellen. Pneumatische Aktuatoren verursachen ähnliche Schwierigkeiten aufgrund des Auftretens von Öl und anderen Unreinheiten in Druckluftanschlüssen. Die Abluft muss üblicherweise gefiltert werden, um Unreinheiten vor der Freisetzung in die Umwelt zu entfernen.

Elektromechanische Aktuatoren haben andererseits weit geringere Auswirkungen auf die Umwelt und werden für Anwendungen, bei denen ein sauberes Umfeld wichtig ist, stark bevorzugt. Die Geräuschreduktion am Arbeitsplatz ist bei vielen Anwendungen ein weiterer Gesichtspunkt. Elektromechanische Systeme haben in diesem Bereich einen großen Vorteil.

Abschließend wurden elektromechanische Aktuatoren für geeignet befunden. Gründe für diese Wahl sind neben den guten Erfahrungen der Bestsim GmbH aus früheren Projekten, die geringen Wartungskosten sowie die nahezu nicht vorhandene Geruchs- und Geräuschbelästigung, wobei Genauigkeit, Geschwindigkeit und Energiebedarf dem geplanten Einsatz entsprechen.

Detaillierung der geplanten Abgrenzung (USP)

Auf Grund der im Vorfeld erfolgten Markt- und Potentialanalyse galt es eine Weiterentwicklung von verfügbarer Simulationshard- & Software unter Einsatz & Kombination modernster Technologien zu planen, die ein optimales Simulations- und Trainingsergebnis liefert. Dazu gehören im Besonderen:

- mindestens 3 oder mehr-seitige CAVE Projektion für Rundumsicht
- Verwendung moderner 3D-Projektoren für Darstellung in stereoskopischer 3D-Grafik
- Headtrackingsystem für genaue, perspektivische Darstellung
- Einsatz von originalen Eingabegeräten für realitätsnahe Haptik
- Bewegungssystem zur Übertragung der auftretenden Kräfte an den Fahrer
- modularer Aufbau mit austauschbaren Cockpits für Schulung an verschiedenen Modulen
- komplette Neuentwicklung von Trainings- und Schulungssoftware für Flurförderzeuge mit integrierter Auswertungs- und Analysefunktion, moderner 3D-Grafik sowie authentische Umgebungen und Fahrzeuge

Erarbeitung technischer Vorgaben

Folgende Richtlinien und Vorgehensweisen für die zu entwickelnde Maschine wurden ermittelt:

- Entwicklung und Produktion gemäß EG-Maschinen-Richtlinie 2006/42/EG vom 17. Mai 2006
- Risikobewertung nach ISO 14121
- Performance-Level-Analyse und Festlegung der Kategorie (PLr)
- DIN EN 12100 Sicherheit von Maschinen – Grundbegriffe, allgemeine Gestaltungsleitsätze, Grundsätzliche Terminologie, Methodik, Risikobeurteilung
- DIN EN 60204-1, 2006 Sicherheit von Maschinen – Elektrische Ausrüstungen von Maschinen, Teil 1: Allgemeine Anforderungen
- DIN EN ISO 13849-1: Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen
- Niederspannung EG-Richtlinie (2006/95/EG) vom 12. Dezember 2006

Eine umfangreiche Risikoanalyse und Bewertung nach ISO 14121 wurde durchgeführt. Nach Ermittlung des PLr wurde eine Sicherheitsschaltung zur Risikominimierung entwickelt. Das Schaltungskonzept umfasst neben einem zertifizierten Not-Aus-Kreis, eine Vielzahl an Sicherheitseinrichtungen (Türkontaktschalter, Überwachungskamera, Bremsen im Bewegungssystem sowie Schutzmaßnahmen zu ungewolltem Anlaufen der Simulation).

Eine umfangreiche Dokumentation sowie ein Handbuch mit allen Sicherheitsvorschriften wurden erstellt.

Projektkonzeption und Untersuchung Programmieraufwand

Analyse der Steuerung bei Fahrzeugsimulatoren, Beachtung der Umsetzung der „Force Feedback (FFB)Technologie“, Prüfen von Alternativen

Zur Analyse der Steuerungen von Flurförderzeugen wurden der Bestsim GmbH verschiedene Fahrzeuge zu Testzwecken zur Verfügung gestellt. Dazu zählen:

- Stapler und Schlepper der Firma Jungheinrich (Modellserien „EZS“ & „EFG“) sowie
- Stapler der Firma Still (Modellserie „RX-60“)

Verschiedenste Testreihen wurden mit oben genannten Fahrzeugen durchgeführt. Moderne Flurförderzeuge verfügen über starke Elektro-/Servomotoren, welche direkt mit dem Lenkgetriebe verbunden sind. Die Krafteinwirkung, die auf den Fahrer übertragen wird, ist gering. Dadurch werden Belade- und Entladevorgänge erleichtert und eine hohe Wendigkeit bei minimalem Kraftaufwand für den Fahrer ist gewährleistet. Unebenheiten der Fahrbahn und andere Kräfte die sich auf den Fahrer über-

tragen, werden nun direkt vom Bewegungssystem auf das Chassis und somit indirekt auf die Lenkung übertragen. Dieses Prinzip ermöglicht ein realistischeres Gefühl beim Führen der Fahrzeuge.

Aufnahme der technischen Anforderungen / Spezifikationen

Im Zuge der Entwicklung wurden Konzepte erstellt und technische Anforderungen und Spezifikationen festgelegt. Ein grobes Schema der Simulationstechnik sowie erste Planungen wurden erstellt. **Aufnahme & Bewertung der relevanten Kenngrößen, wie Beschleunigungsverhalten, Nutzungsbedingungen der Anlagentechnik, etc.**

Technische Informationen zu den Modulen wurden von den Firmen Still GmbH und Jungheinrich AG zur Verfügung gestellt, um die Modelle und das Verhalten der Anlage an die realen Bedingungen anzugleichen:

STILL RX60-20

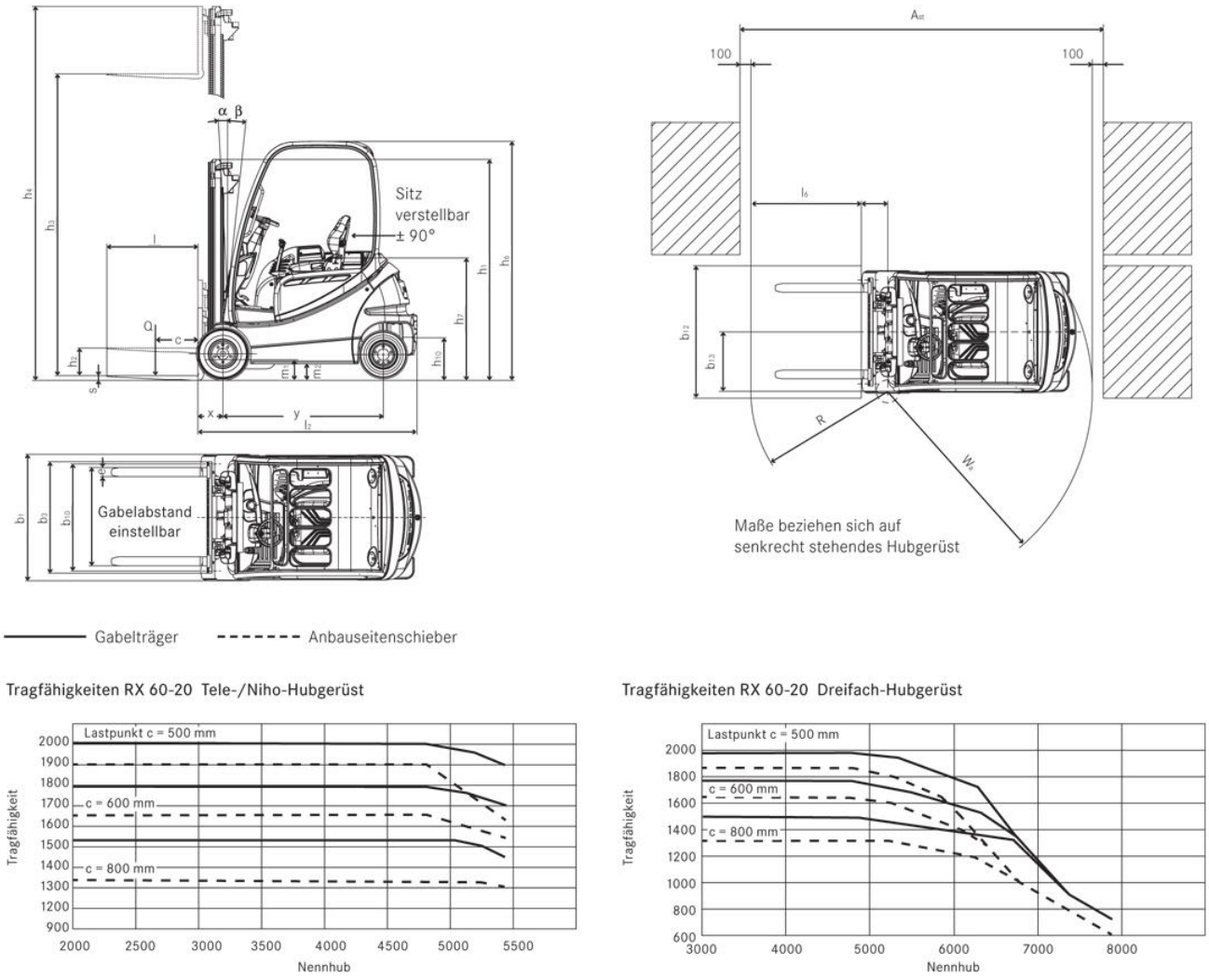

Abb.1: Schema STILL RX 60-20

Auf Grund der Erhebung der fahrzeugspezifischen Daten wurde ein Konzept für Hard- und Software erarbeitet, welches das reale Fahrverhalten der ausgewählten Fahrzeuge darstellen/abbilden kann.

Die softwareseitige Darstellung kann nur mit einer leistungsfähigen Physik-Engine realisiert werden, die in der Lage ist, dynamische Objekte wie Fahrzeuge, Umgebungen und Behälter/Waren miteinander reagieren zu lassen. Ein Anforderungskatalog für die Physik-Engine wurde auf Basis dieser Daten erstellt.

Jungheinrich EZS 570

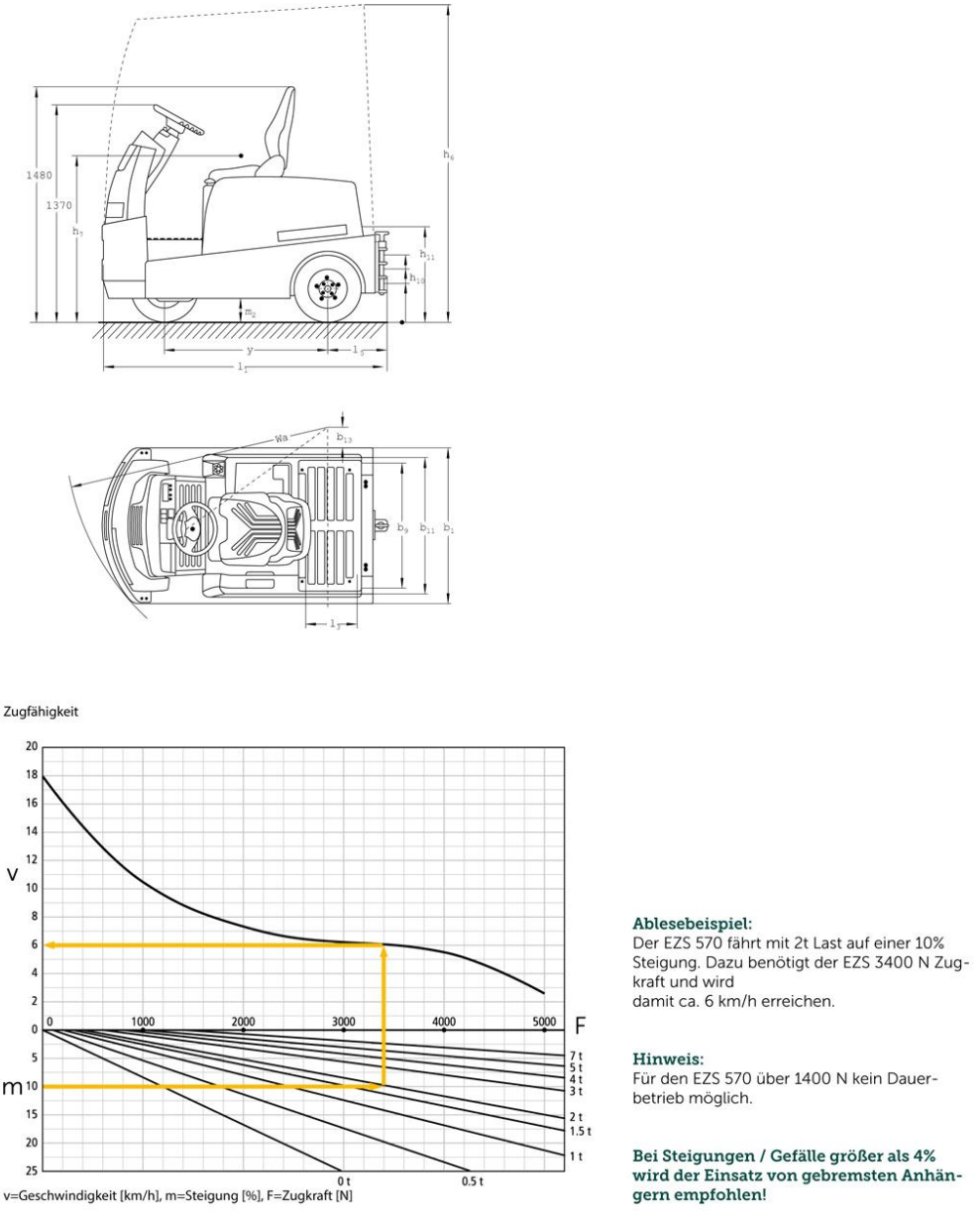

Abb.2: Jungheinrich EZS 570 Schlepper

Anforderungsanalyse zu Datenumfang

Eine Anforderungsanalyse zum voraussichtlichen Datenumfang wurde durchgeführt. Als Ergebnis stellten sich große und vor allem unterschiedliche Datenmengen heraus, die durch ein System kategorisiert werden müssen, da auch hier die Herangehensweise die Modulbauweise berücksichtigen muss. Eine objektorientierte, datenbankgestützte Datenverwaltung wurde entwickelt.

Auswahl eines geeigneten Projektionssystems im Hinblick auf die Erfüllung der Entwicklungsziele

Die anfänglich geplante Halbkugelprojektion in der Front des Fahrers stellte sich im Zuge der Recherche als nicht optimal heraus. Im Verlauf der Recherche war es nötig verschiedene Experten in diesem Gebiet zu Rate zu ziehen und verschiedene Möglichkeiten in einer praxisnahen Umgebung zu testen. Verschiedene Veröffentlichungen zum Thema Projektion von virtuellen Umgebungen wurden studiert und ausgewertet:

→ Interaktion in 3D Umgebungen: ***„High End Projektion und Bedienbarkeit“*** von Dr. Christian Knöpfle; Fraunhofergesellschaft

→ ***„Eintauchen in virtuelle Welten“*** Fraunhofer Institut für Fabrikarbeiten und Automatisierung IFF, Magdeburg

→ ***„Building a Spatially Immersive Display: Hutcave“*** von Janne Jalka, Helsinki University of Technology – Finnland

Gleichzeitig wurden Termine für Konsultationen bei Bildungs- und Forschungseinrichtungen vorgenommen, um praktische Erfahrungen, Eindrücke und zusätzliche Informationen zu erhalten.

→ Technische Universität Dresden, Institut für Fördertechnik, Baumaschinen und Logistik, Forschungs- und Entwicklungssimulator für Baumaschinen

→ Konsultation des Fraunhofer IFF in Magdeburg und des **„ELBE DOM“** (360° Laserprojektionssystem im Virtual Development an Training Centre)

→ Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, VR-Zentrum: Informationsaustausch zum Thema 5-Seiten-CAVE-Projektion mit passiver Stereoskopie.

Fazit: Die optimale Projektionsumgebung für einen Schulungssimulator mit dem Schwerpunkt Flurförderzeuge ist eine sog. CAVE-Projektion mit mindestens 3 - optimal 5 -Projektionsflächen. Beim Führen von Flurförderzeugen und Schulungen in diesem Bereich ist besondere Priorität auf das Rangieren, Vor- und Zurücksetzen und auf Fahrmanöver in verkehrsreichen und engen Umgebungen (Lagerhallen) zu legen. Der Fahrer muss immer den gesamten Verkehrsraum um ihn herum im Auge behalten, um Unfälle und Schäden zu vermeiden. Hat ein Stapler eine Last auf der Gabel, die die Sicht nach vorne einschränkt, muss zwingend rückwärts gefahren werden.
Eine große Gefahr beim Führen von Flurförderzeugen sind Personen, die sich im Arbeitsbereich der Fahrzeuge aufhalten, aus Regalgängen kommen oder auf andere Arten die Fahrwege der Flurförderzeuge kreuzen. Beim Führen von Schleppern ist ebenfalls der Blick nach Hinten zwingend erforderlich, da ein Schlepper bis zu vier Trailer/Anhänger ziehen kann, die nicht spur-treu laufen und so Unfälle und Schäden verursachen können. Eine CAVE lässt alle diese Blickrichtungen zu und kann um eine Deckenprojektion erweitert werden, die es erlaubt auch Einlagerungen von Behältern in Hochregalen zu trainieren, da der Blick nach oben uneingeschränkt genutzt werden kann.

Ein weiterer Vorteil der CAVE-Projektion ist die Variabilität der Projektionsflächen untereinander. Da die Projektionsflächen gleichrangig und identisch angeordnet sind, kann bei einem Modulwechsel (z.B. Stapler auf Schlepper) die Frontansicht mit der Rückansicht getauscht werden ohne dass das Bewegungssystem mechanisch angepasst werden muss. Dies führt zu einer größeren Flexibilität der gesamten Anlage und zur Umplanung des geplanten Bewegungssystems.

Daraufhin entwickelten wir ein Konzept für einer 5-seitige stationäre CAVE sowie ein Konzept für eine 3-seiteige mobile CAVE als Funktionsmuster. Verschiedene Projektionsmöglichkeiten, Projektoren und Leinwände wurden getestet und bewertet. Verschiedene Varianten des Aufbaus wurden durchdacht.

Abb. 3: Schema: 3-seitige CAVE Projektion

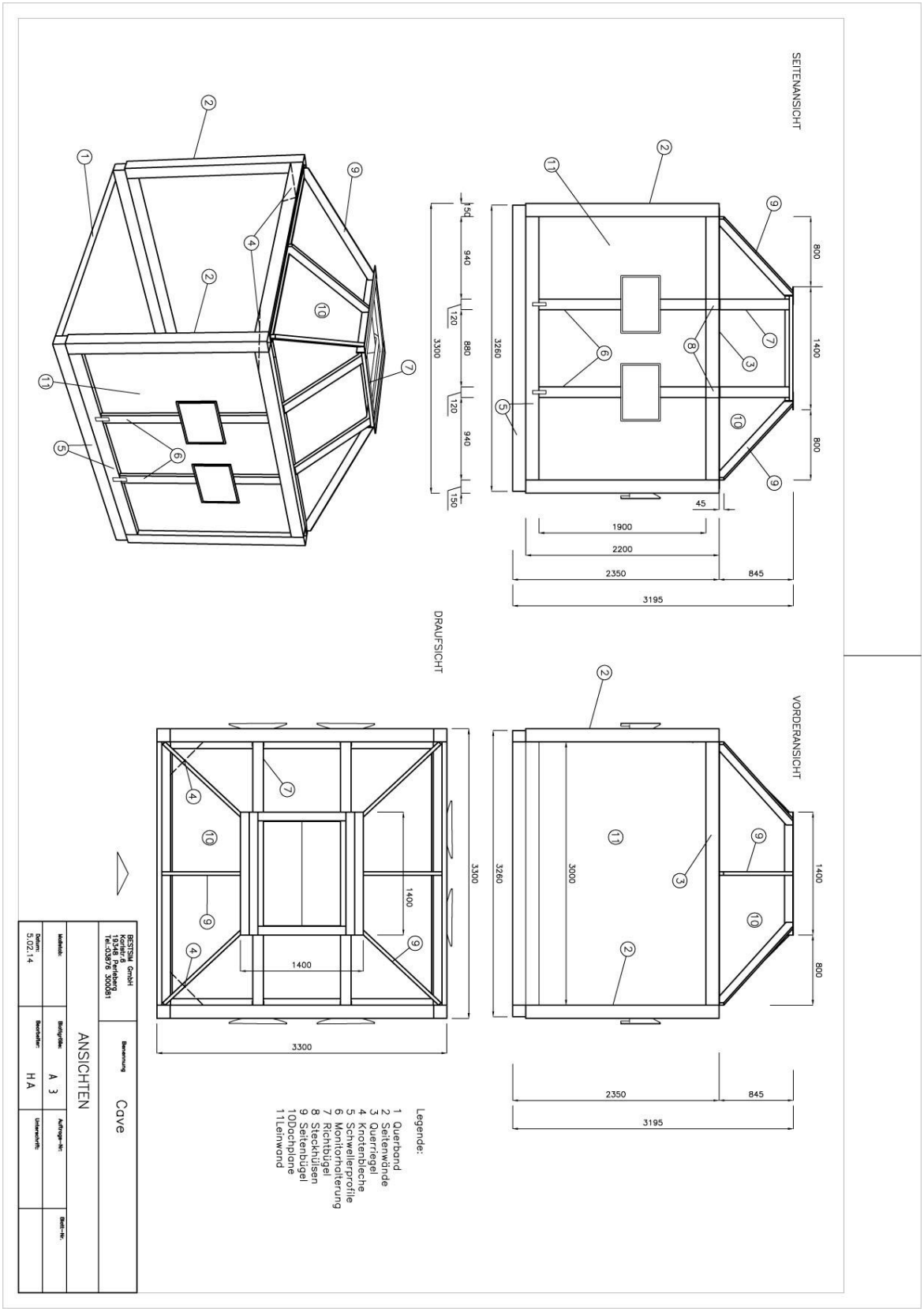

Abb. 4: Konstruktionszeichnung

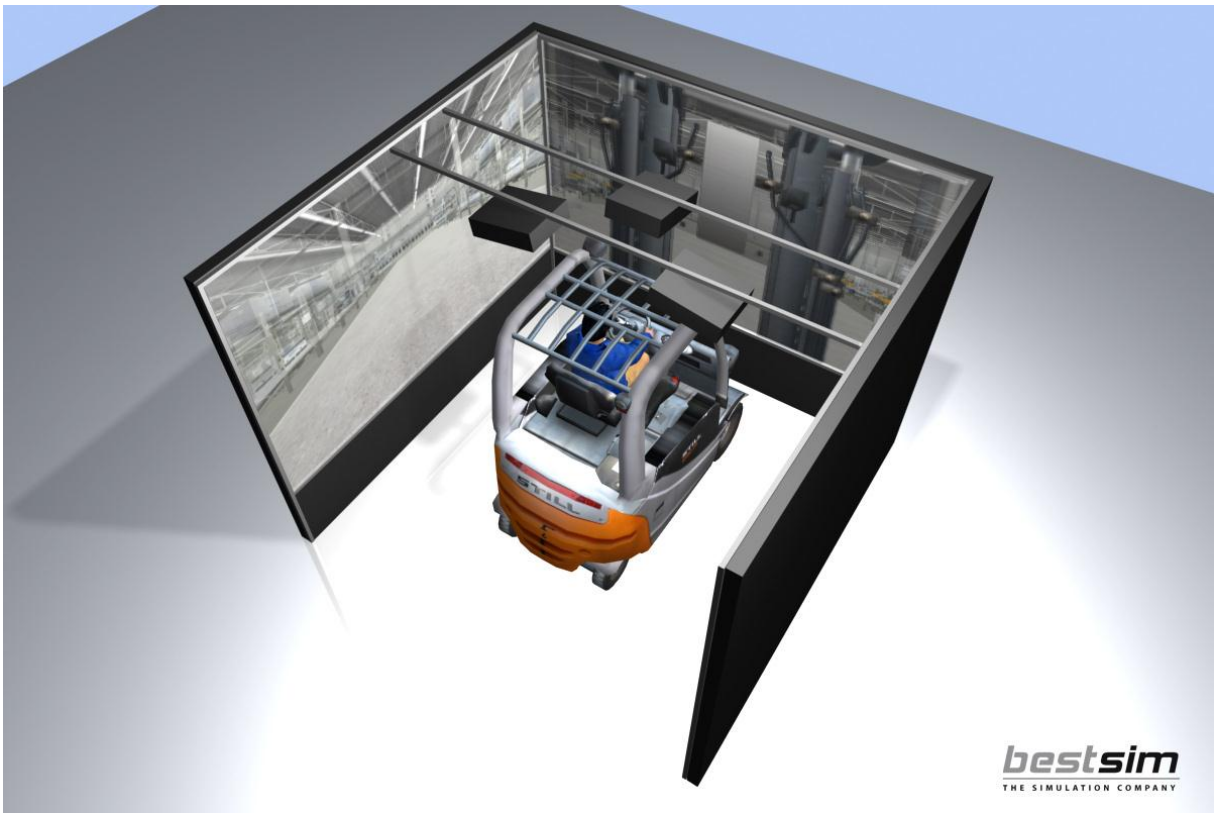

Abb. 5: 3-seitige CAVE-Projektion (Studie - perspektivisch)

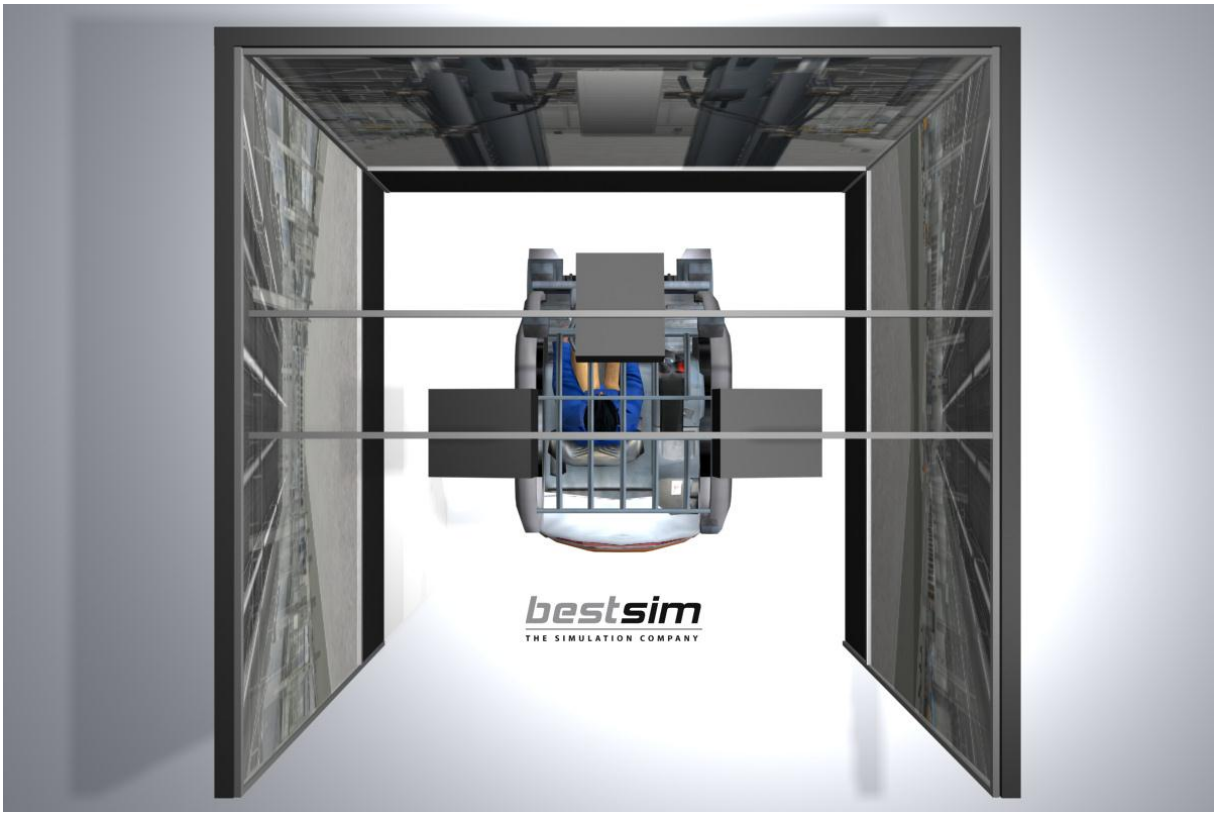

Abb. 6: 3-seitige CAVE-Projektion (Studie - Draufsicht)

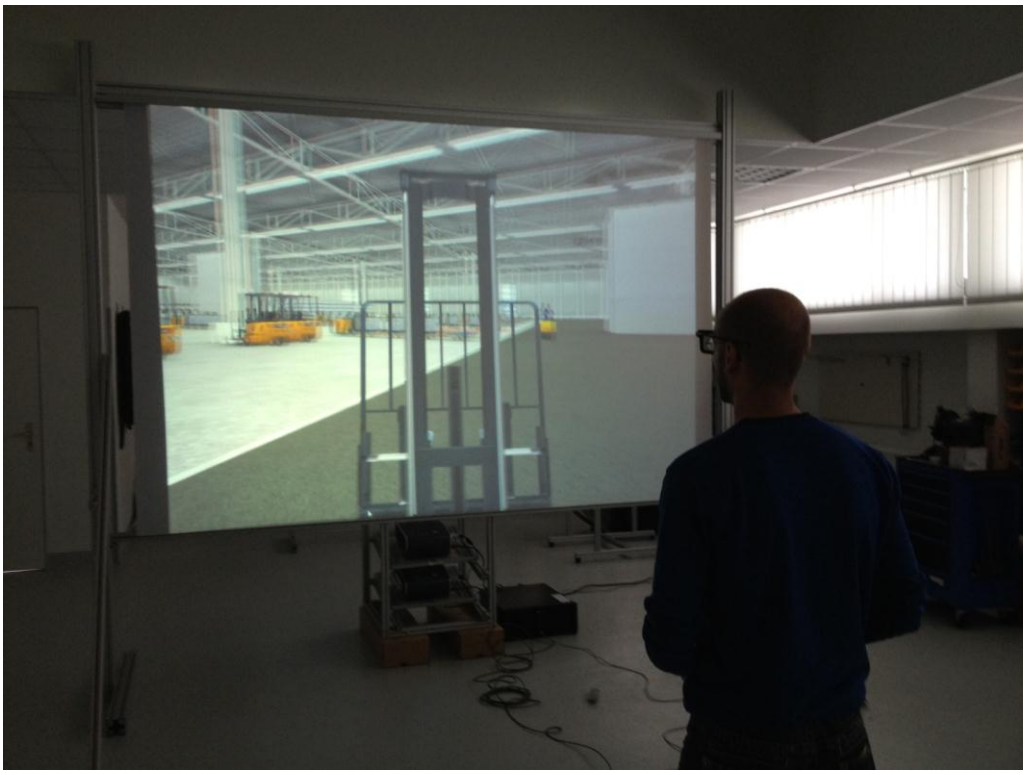

Abb. 7: Testaufbau Projektion und Leinwände

Abb. 8: 3-seitige CAVE-Projektion (Innenansicht Schleppermodul)

Nach verschiedenen, getesteten Varianten entschieden wir uns für eine klassische Auf-Projektion mit einer Leinwandgröße von 300cm x 195cm (je Leinwand). Die Projektion wurde realisiert mit Ultrakurzdistanzprojektoren der Firma HITACHI, welche für diesen Einsatz im Bereich Auflösung, Flexibilität und Lichtstärke am geeignetsten erschienen.

Entwicklung der Basisversion

Die Entwicklung der Basisversion – mit Blick auf zukünftige modulare Erweiterbarkeit – begann mit der Berechnung/Erhebung der Daten für die Entwicklung der CAVE → Fläche, Platzbedarf einzelner Komponenten, Gewicht, Abmessungen unter Berücksichtigung der statischen / dynamischen Berechnungen.

Ein vorläufiges Sicherheitskonzept wurde entwickelt und die entsprechende Sensorik geplant und umgesetzt (Not-Aus-Kreis, Türkontaktschalter, Überwachungskamera).

Zentraler Punkt der Entwicklung der Basisversion war die Konzeption des Bewegungssystems im Hinblick auf die modulare Erweiterbarkeit. Die Herausforderung bestand zu großen Teilen darin, ein Bewegungssystem zu entwickeln, dass die Spezifikationen der einzelnen Fahrzeuge abbilden kann und wobei die verschiedenen Module mit geringem Aufwand getauscht werden können.

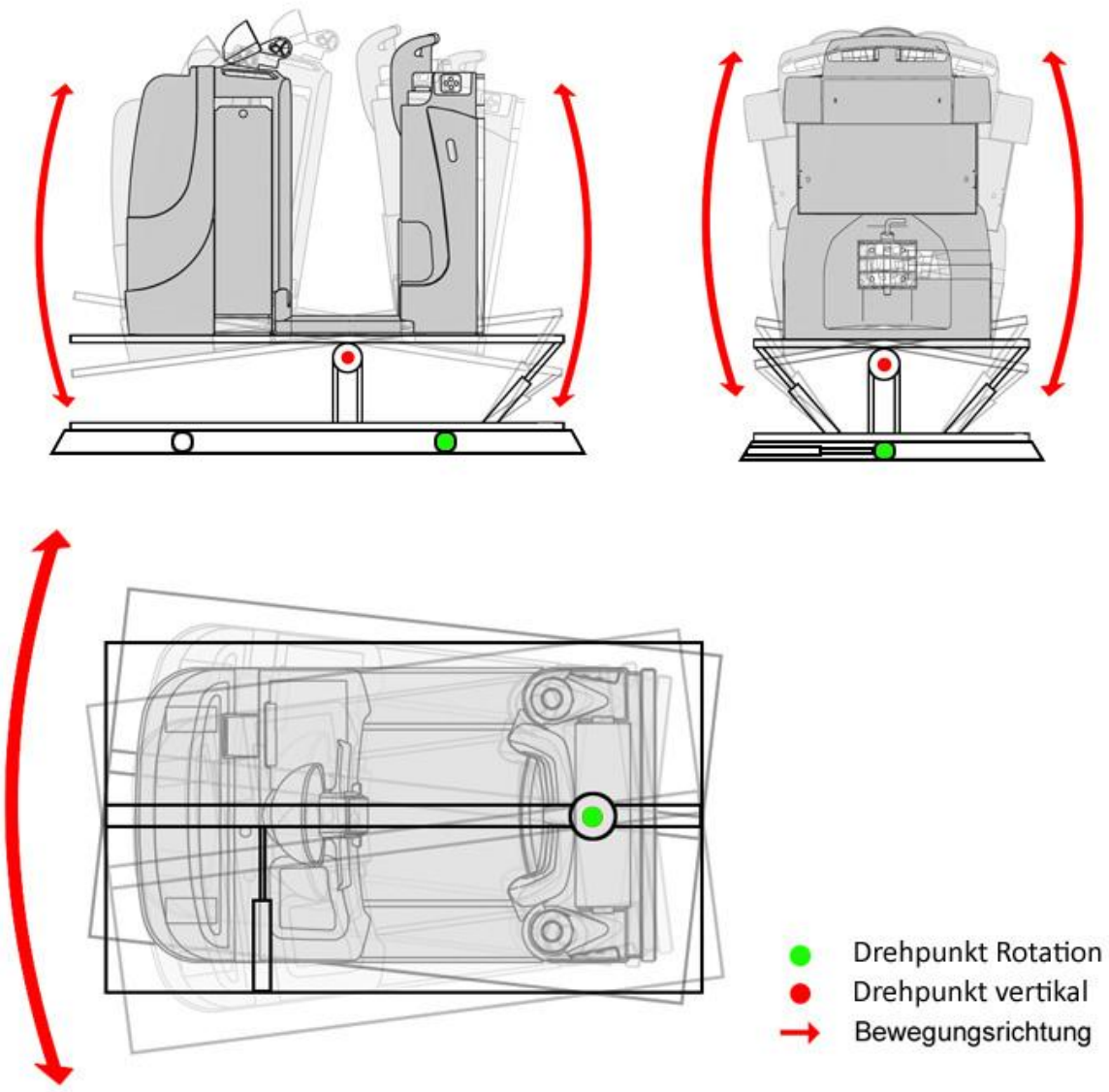

Abb. 9: Bewegungsschema Schlepper/Routenzug.

Die in der Abbildung 9 dargestellten Bewegungen eines Schleppers ergeben sich aus der Konstruktion eines solchen Fahrzeuges. Anders als beim Gabelstapler hat der Schlepper die Lenkachse im Bereich der Vorderräder, der Gabelstapler lenkt generell über die Hinterräder. Durch den Einsatz der CAVE-Projektion, die eine individuelle Verteilung der einzelnen Ansichten erlaubt, entfällt die anfangs geplante Rotation der Bewegungsplattform um 180° (ist nötig um die Drehpunkte – PIVOT – der unterschiedlichen Fahrzeuge abzubilden). Beispiel: Ein Gabelstapler wird nun um 180° gedreht auf die Plattform montiert und die Ansichten (Front, Back, Left, Right) werden softwareseitig auf das Fahrzeug angepasst. Das Motion-Queing-Modell (Bewegungs- und Kräfteschema) variiert natürlich von Fahrzeug zu Fahrzeug und kann mit dem System einzeln angepasst und natürlich separat gespeichert werden, so dass die Schemen den einzelnen Fahrzeugen zugeordnet werden können.

Entwicklung des Bewegungssystems

Wie schon im Vorfeld des Projektes recherchiert, gibt es besondere Anforderungen an das optimale Bewegungssystem zur Simulation des Fahrverhaltens von Flurförderzeugen. Flurförderzeuge haben unterschiedliche Drehpunkte und auch Sitzpositionen. Durch eine CAVE-Projektion kann die Sicht softwareseitig angepasst werden, so dass die Drehpunkte durch die unterschiedliche Montage der Fahrzeuge auf der Plattform angepasst werden können.

Im Vorfeld der Konstruktion war es eine große Herausforderung eine geeignete Rahmenkonstruktion zu entwickeln, welche die Drehpunkte optimal auf das Modul überträgt. Gerade der Rotationsaktuator stellte sich als problematisch dar, da er sich unabhängig von den Aktuatoren bewegen sollte, die für die Hub- (Heave) und Neigebewegung (Roll/Pitch) verantwortlich sind.

Eine Konstruktion mit vorderem Kugelgelenk sowie einem Schlitten im hinteren Bereich, auf dem unabhängig die Aktuatoren für die Neigebewegung montiert sind, schien die optimale Lösung. Nach einigen Tests und Änderungen der Konstruktion konnte schließlich dieses Bewegungssystem realisiert werden.

Ein weiteres wichtiges Kriterium bei der Entwicklung des Systems war die Berechnung des „Payloads“, der Lasten, die das System aufnehmen und bewegen kann. Hier legten wir besonderes Augenmerk auf den Lastenschwerpunkt und die dynamische Lastenverteilung, die im Betrieb des Systems durch die Beschleunigung entsteht.

Im Anschluss an die Entwicklung wurde ein Testsystem produziert. Der Stahlrahmen wurde geschweißt, der Schlitten separat konstruiert und mit dem Rahmen verbunden. Spezielle Kugelgelenke wurden gewählt, um die beweglichen Teile verschleißarm zu verbinden und die entstehenden Kräfte aufzunehmen.

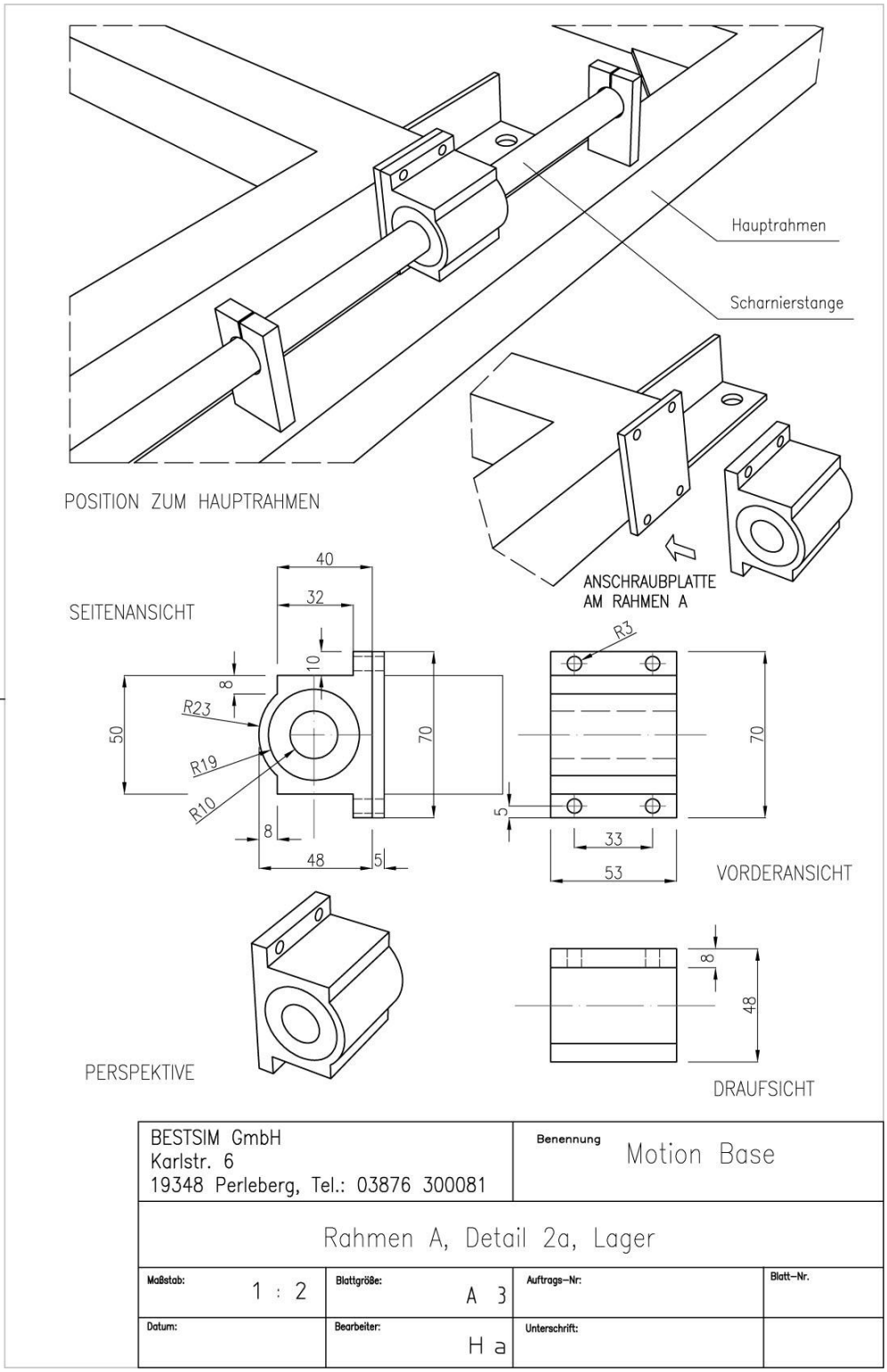

Abb. 10: Detailzeichnungen Bewegungssystem (Aufnahme Schlitten)

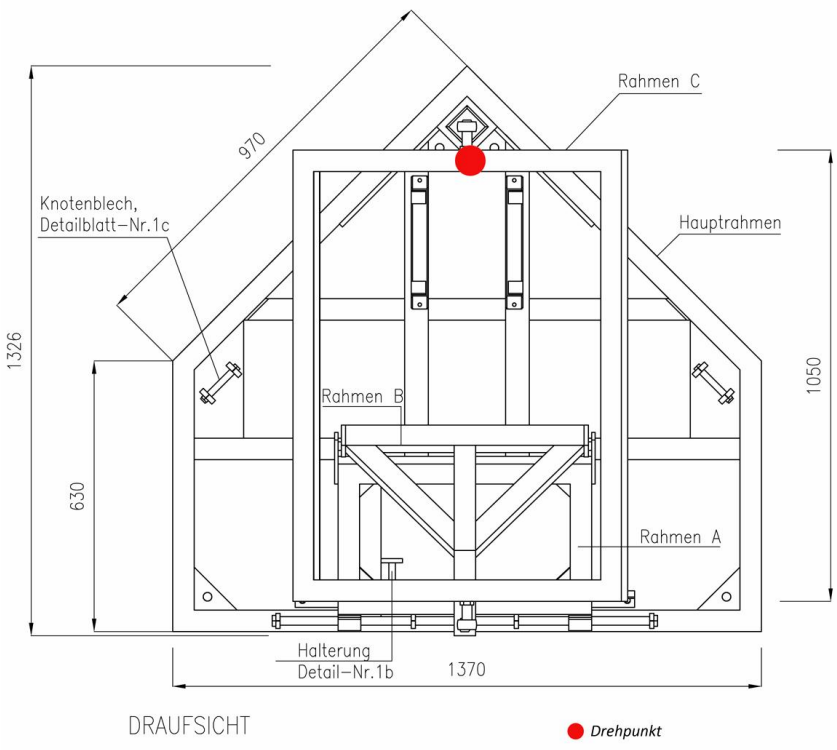

Abb. 11: Rahmenkonstruktion Bewegungsplattform (Draufsicht)

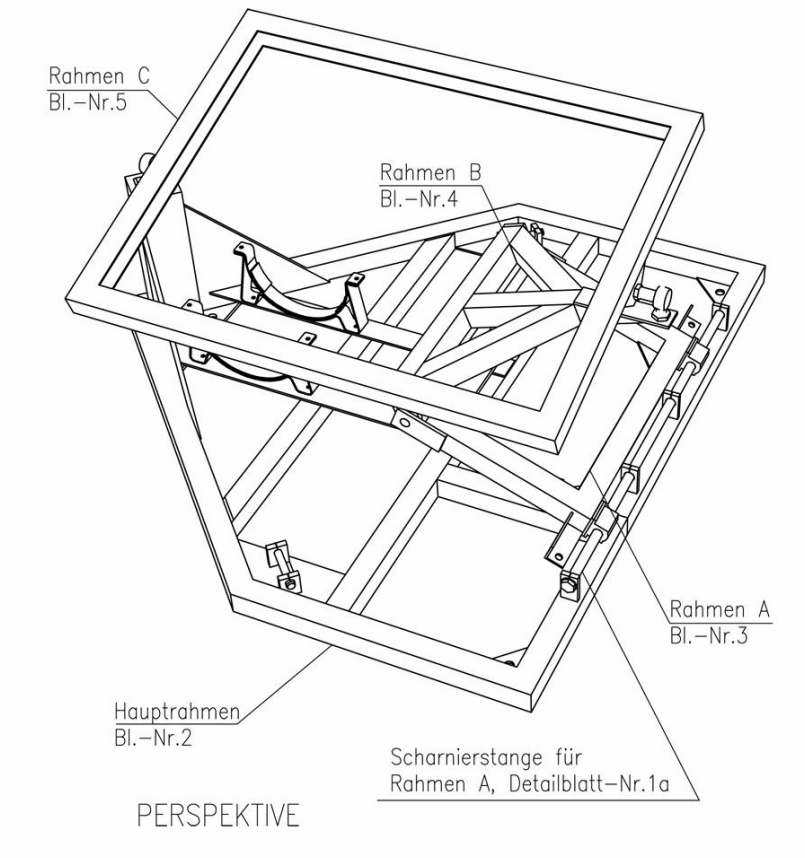

Abb. 12: Rahmenkonstruktion Bewegungsplattform (Perspektive)

Entwicklung Staplermodul STILL RX 60-25

Nach umfangreicher Prüfung aller Daten und Maße auch in Hinblick auf unterschiedliche Transportmöglichkeiten und den Betrieb auf einem Bewegungssystem kam nur ein Nachbau der Fahrzeuge in Leichtbauweise in Frage, so dass bis auf die reinen Cockpitelemente keine weiteren Originalteile verwendet werden konnten, da Flurförderzeuge – insbesondere Gabelstapler – von ihrer Art her sehr schwer sind (Gegengewichtsstapler).

Die Herausforderung ein Testmuster zu produzieren, dass sehr leicht ist und trotzdem dem Original ähnelt, ist nur mit Glasfaserkunststoffen realisierbar. Eine entsprechende Negativform wurde produziert. Für die Form (Negativ) wurden die Originalfahrzeuge vermessen und jedes Detail wurde abgeformt. Das Testmuster (Positiv) wurde produziert, lackiert und die Eingabegeräte sowie die Elektronik wurden eingebaut.

Um das Wechseln der unterschiedlichen Module gewährleisten zu können, wurde ein spezieller Grundrahmen entwickelt um die modularen Erweiterungsmöglichkeiten des Systems nicht zu beschränken. Auch mit Blick auf Arbeitsschutz und Sicherheitsbestimmungen kam nur ein sehr leichtes Modul in Frage, um nicht beim Modulwechsel Hebezeuge oder ähnliche Hilfsmittel einsetzen zu müssen.

Das Gewicht konnte durch die Glasfaser-Umbauten von 3500kg auf 280kg reduziert werden. Die Optik wurde so angepasst, dass sie dem Original entspricht.

Abb. 13: STILL RX 60-25 (Original)

Abb. 14: STILL RX 60-25 Testmuster aus GFK-Aluminium-Konstruktion

Um verschiedene Fahrzeuge von einem oder auch unterschiedlicher Hersteller einsetzen zu können, war es nötig eine so gut wie möglich universelle Schnittstelle zur eigentlichen Simulationssoftware zu schaffen. Nach Recherche und Diskussion mit Herstellern fiel die Wahl auf eine Schnittstelle mit einer CanBus-Übersetzung. Fast alle Hersteller von modernen Flurförderzeugen setzen CanBus-Steuerungen in Ihren Fahrzeugen ein. Wenn es gelingt direkt an diese CanBus-Steuerungen anzuknüpfen erleichtert dies die Adaption zukünftiger Modelle immens. Auch könnten dann die vorhandenen Steckverbindungen und Anschüsse leichter adaptiert werden.

Zur Realisierung der Ansteuerung der Eingabegeräte und Cockpitelemente wurde ein Leiterplattenlayout entwickelt und ein Testmuster geätzt um die grundlegenden Funktionen zu testen.

Das entwickelte System zur Datenübertragung mittels CanBus funktionierte, so dass auf Basis des handgearbeiteten Testmusters eine Leiterplatte produziert wurde. Die Mikroprozessoren auf der Platine wurden mit der entwickelten Software programmiert.

Mit diesem System ist die Bestsim GmbH nun in der Lage Fahrzeuge der beiden großen Marken STILL und Jungheinrich in die Software einzubinden und Bedienelement und Cockpitanzeigen der Originalfahrzeuge zu nutzen. Dies hat neben der technischen Vereinfachung auch positive Auswirkungen auf die Trainingssituation, da an originalen Systemen gearbeitet wird die sich in Haptik und Optik nicht unterscheiden.

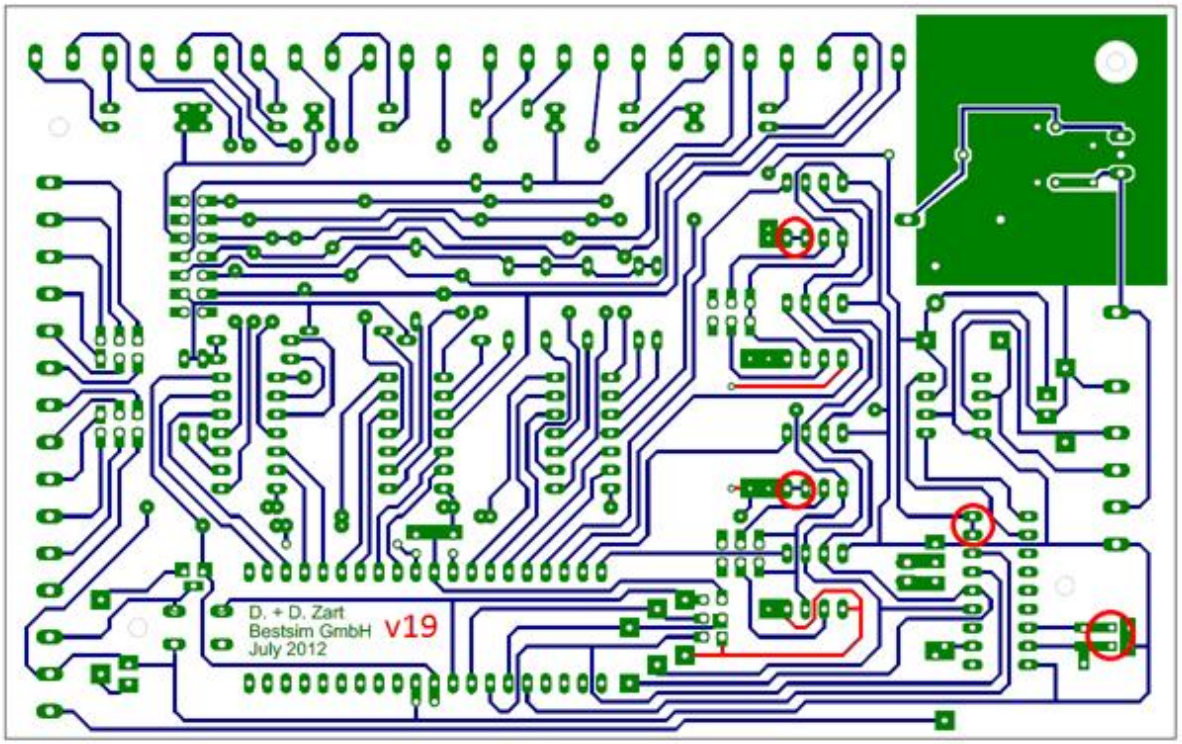

Abb. 15: Leiterplattenlayout CanBus-Ansteuerung

Durch die Entwicklung der Canbus-Ansteuerung konnten für das Testcockpit nun ausnahmslos original Bedienelemente des Herstellers verbaut werden. Zahlreiche Adaptionen und Anpassungen mussten vorgenommen werden um die Originalteile nahtlos in das produzierte Testcockpit einzubauen. Die Bedienelemente wurden platziert und ein neuer Kabelbaum wurde entwickelt, der die Datenübertragung aus dem Cockpit an den Server (Trainingssoftware) sendet und alle Anzeigen mit der benötigten Betriebsspannung versorgt. Ein 10“ Touch-Panel wurde integriert um die Auftragssteuerung mit dem Fahrer zu koordinieren.

Als besondere Herausforderung galt die Integration des Head-Tracking-System. Dieses System sorgt für eine perspektivisch korrekte Darstellung der Umgebung im Verhältnis zur Position des Kopfes des Fahrers. Gerade in einer CAVE-Projektion kann es ohne genau justiertes Headtracking zu Verzerrungen in der Projektion kommen (z.B. an den Ecken an denen zwei Leinwände im 90°Winkel aneinanderstoßen, müssen die Fluchtlinien aus Betrachtersicht gerade weiterlaufen – ein „Abknicken“ würde nicht nur stören, sondern den Gesamteindruck der Umgebung massiv verschlechtern.).

Die Interaktion der Infrarotsensoren des Trackingsystem erfolge im Dachbügel des Testcockpits, so dass der gesamte Bewegungsraum des Fahrers erfasst werden konnte.

Software-Entwicklung Basissoftware

Programmierung der Basissoftware (Engine) mit allen grundlegenden Funktionen

Vor Beginn der Programmierung fand eine umfassende Analyse und Evaluierung möglicher Optionen zur Realisierung mit vorhandenen Engines statt. Folgende Produkte wurden auf Eignung geprüft:

→ Unity Engine
→ CryEngine 3
→ Quest 3D
→ Unreal 3.0 / 4.0

Im Vergleich der verschiedenen Varianten in Bezug auf Kosten/Nutzen, Lizenzkosten und Integration vorhandener Modelle wurde die Quest 3D – Engine als Basis für die Gesamtsoftware gewählt. Vorteil dieser Engine – neben einem guten Preis-/Leistungsverhältnis ist die gut dokumentierte Möglichkeit eigene C++ Komponenten als separate „Channels“ in die Engine zu implementieren und diese damit anzupassen und zu erweitern. Somit mussten Standardprozeduren nicht neu programmiert werden, sondern es konnten die integrierten Routinen genutzt werden ohne auf diese beschränkt zu sein.

Bei der Auswahl der Software für die Physikberechnungen wurden folgende potentiell geeignete Produkte getestet und auf Eignung geprüft.

→ PhysiX
→ Havok
→ Karma
→ True Exis
→ Newton

Keine der potentiellen am Markt erhältlichen Produkte konnten die Anforderungen erfüllen.

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut (IGD) in Rostock wurde eine Physik-Engine entwickelt, die dynamisches Fahrverhalten, sowie eine reale Behälterphysik ermöglicht. Dabei lag der Fokus neben der Simulation der Fahrzeuge auf der Interaktion mit deren Umgebung. Das Verhalten von unterschiedlich beladenen Transportbehältern auf der Gabel einen Frontstaplers (oder auf einem Trailer) sollte so real wie möglich abgebildet werden. Ein überladener Gabelstapler neigt dazu über eine Kippkante zu Kippen (siehe Standdreieck Gabelstapler Abb.) – dieses sollte so nah wie möglich an der Realität auch in der Simulation passieren. Mit Hilfe der entwickelten Physik-Engine konnte dieses Entwicklungsziel erreicht werden.

Das Fahrverhalten der einzelnen Fahrzeuge sowie das Verhalten der verschiedenen Behälter kann mit der entwickelten Software so realitätsnah dargestellt werden, dass ein Training von Fahrern mit Hilfe der entwickelten Software den Ansprüchen voll entspricht.

Die eingesetzten Module wurden inklusive aller notwendigen Funktionen als detaillierte 3D-Modelle nachgebaut. Ebenso wurden mehrere Schauplätze als 3D-Trainingsumgebung nachgebaut, die den realen Arbeitsumgebungen in der Lagerlogistik entsprechen.

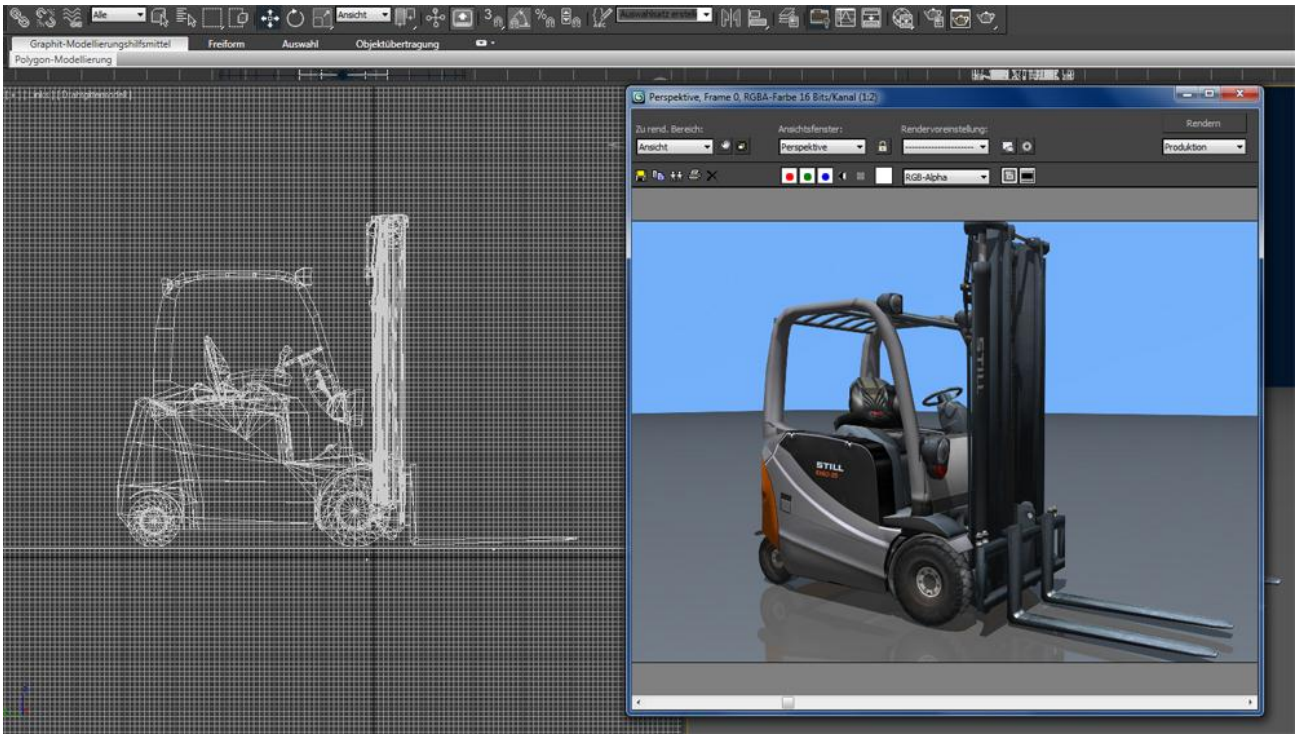

Abb. 16: STILL RX 60-20 als 3D-Modell

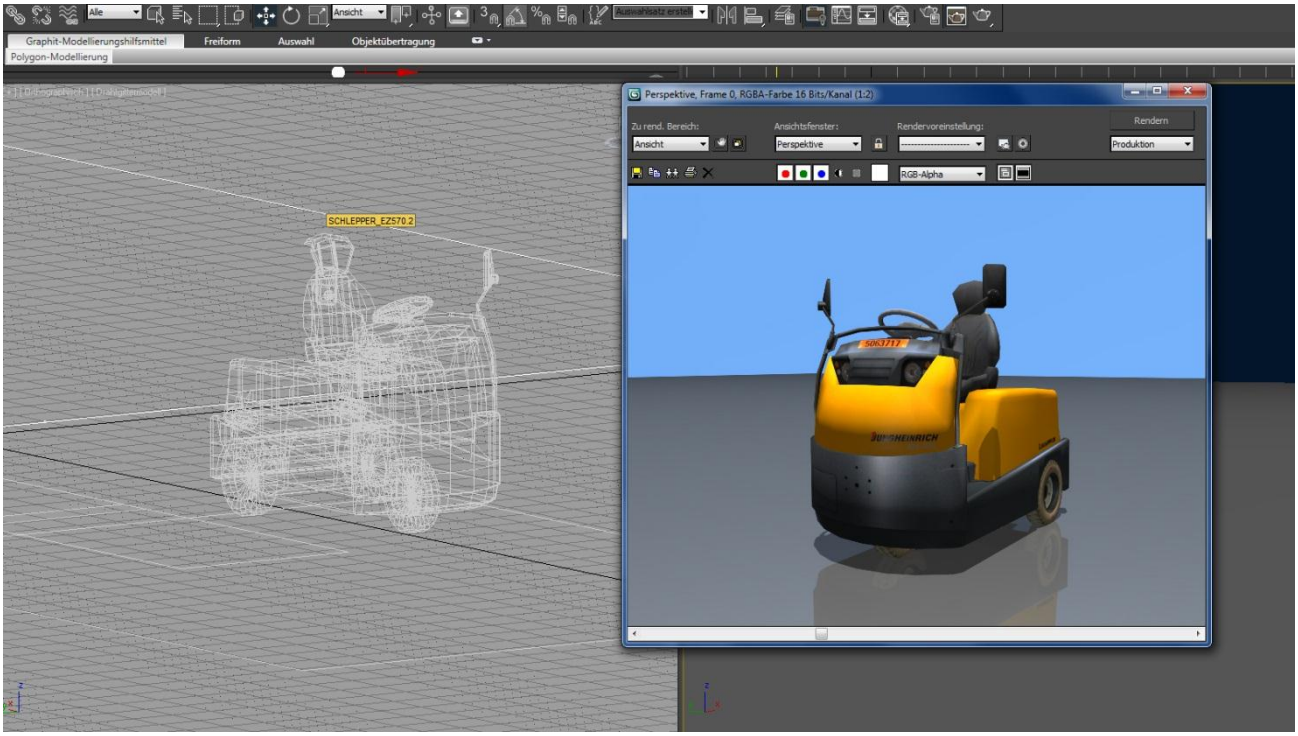

Abb. 17: Jungheinrich EZS 570 als 3D-Modell

Abb. 18: Simulationsumgebung „Be- und Entladen von Zügen“

Abb. 19: Simulationsumgebung „Be- und Entladen von LKW“

Programmierung der grundlegenden Steuerung

Basierend auf der Physik-Engine wurde eine grundlegende Fahrphysik für alle Fahrzeuge (Module) entwickelt, die im späteren Verlauf flexibel angepasst werden kann. Alle Arbeiten wurden bewusst so gestaltet, dass sämtliche relevante Parameter per Konfigurationsdatei festgelegt und gespeichert werden können.

Beispielparameter Fahrphysik:

- Motorkraft (Drehmoment)
- Abmessungen
- Gewicht
- Reifengröße
- Reifenart
- Reifenhaftung
- Haftung Untergrund
- Anzahl Räder
- Anzahl Achsen
- Fahrzeugschwerpunkt
- Lastenschwerpunkt

uva.

Aus diesen Parametern, die bei Modulentwicklung festgelegt werden bzw. den realen Fahrzeugdaten entsprechen, berechnet die Software Fahreigenschaften und Fahrverhalten als Ergebnis der Parametrisierung (z.B.: Bremsweg, Kippverhalten, Beschleunigung, Höchstgeschwindigkeit …).

Die grundlegende Steuerung erfolgt ebenfalls physikalisch über eine Parametrisierung, d.h. durch Modifikation des Parameters X ändert sich Fahrverhalten Y und Z – z.B. durch Vergrößerung des Parameters “Lenkwinkel“ kann das Fahrzeug engere Kurven fahren und der Wendekreis verringert sich, gleichzeitig steigt aber auch die Gefahr, dass das Fahrzeug in Kurven zu Kippen droht.
Die physikalische Berechnung des Fahrverhaltens, basierend auf den fesgelegten Parametern, bewirkt also, dass die Änderung eines Parameters Auswirkungen auf mehrere Fahreigenschaften haben kann.

Ebenso kann die Steuerung der einzelnen Fahrzeuge auf der Eingabeseite durch Parameter konfiguriert werden.

Beipielparameter Eingabeseite:

- Lenkwinkelbegrenzung
- Meßweg Gaspedal
- Meßweg Bremspedal
- Sensitivität der Steuerhebel beim Gabelstapler
- Einstellung Lenkradspiel (Toter Bereich)

uva.

Software-Entwicklung der Trainingsszenarien

In Zusammenarbeit mit den Herstellerfirmen STILL GmbH und Jungheinrich AG und deren Zugriff auf empirische Daten wurde ein Anforderungskatalog zu den Trainingsszenarien erarbeitet. Die Abteilung Logistik der Volkswagen AG Wolfsburg stellte der Bestsim GmbH Daten über Unfälle mit Flurförderzeugen der letzten 5Jahre zur Verfügung, so dass auch hier ein gezieltes Trainingsprogramm mit Schwerpunkten erarbeitet werden konnte. Letztendlich wurde das Lastenheft zusammen mit zwei Fahrlehrern für innerbetrieblichen Verkehr überarbeitet.

Das grundlegend geplante Trainingskonzept Standardsituationen stufenweise mit Ereignissen/Fehlern/Störungen – sog. Events – zu erweitern wurde für zielführend befunden und auch so umgesetzt.

Beispiel Grundlagenszenario:

- ***Simulationsziel:*** *Fahrer soll sich an Simulationsumgebung gewöhnen und mit der Bedienung des zu simulierenden Flurförderzeugs vertraut machen*
- ***Simulationsumgebung:*** *einfache Lagerumgebung ohne spezielle Herausforderungen, und ohne Bevölkerung durch Dritte (Personen / Fahrzeuge)*

SZ 1:Startszenario*:* ***Erste Schritte*** *(Stapler steht auf dem Parkplatz – markierter Bereich)*

Sicherheitsprüfung:
- *Ausrichtung des Staplers prüfen*
- *Einsteigen und Sitz und Spiegel einstellen*
- *Hubgerüst unten?*
- *Licht einschalten prüfen*
- *Feststellbremse prüfen*
- *Anschnallen*
- *Bremsen prüfen durch anfahren (1m) und abbremsen*

Erster Fahrauftrag:
- Fahre vom Parkplatz zur markierten Position an der Fördertechnik
- Fahrposition Gabelzinken ca. 15 cm über dem Boden
- Halte den Stapler in der markierten Position an
- Prüfe die Ausrichtung des Staplers
- Fahre zurück zum Parkplatz
- Parke den Stapler rückwärts ein
- Stelle den Stapler ab und steige aus
Übungseinheit beendet

Sämtliche Übungen und Eingaben des Trainierenden werden registriert und können im Nachgang eingesehen werden, so dass der Trainer jede Übung auswerten und überprüfen kann. Die Auswertungen können gespeichert oder ausgedruckt werden. Durch die entwickelte Auswertungssoftware können Trainingsinhalte überwacht und gezielt trainiert werden. Ebenso können einzelne problematische Übungen extrahiert und gesondert trainiert werden.

Entwicklung Routenzugmodul „Jungheinrich EZS 570“

Wie im Vorfeld erwähnt, entschieden wir uns auf Basis der Ergebnisse, die wir aus den Recherchen und Gesprächen mit Industrieunternehmen geführt hatten, gegen die Entwicklung eines Schubmastfahrzeugs. Als zweites Modul entschieden wir uns für einen Schlepper/Routenzug der Firma Jungheinrich.

Nach umfangreicher Prüfung aller Daten und Maße auch in Hinblick auf unterschiedliche Transportmöglichkeiten und den Betrieb auf einem Bewegungssystem kam ein teilweiser Nachbau in Frage. Schlepper sind von ihrer Art her nicht so schwer wie Stapler, aber auch hier wurden große Teile in Leichtbauweise gefertigt und angepasst.

Dies war wiederum nur mit Glasfaserkunststoffen realisierbar. Eine entsprechende Negativform wurde produziert. Für die Form (Negativ) wurden die Originalfahrzeuge vermessen und jedes Detail wurde abgeformt. Das Testmuster (Positiv) wurde produziert, lackiert und die Eingabegeräte sowie die Elektronik wurden eingebaut.

Um das Wechseln der unterschiedlichen Module gewährleisten zu können, wurde ein spezieller Adaptionsrahmen entwickelt, um die modularen Erweiterungsmöglichkeiten des Systems nicht zu beschränken. Auch mit Blick auf Arbeitsschutz und Sicherheitsbestimmungen kam nur ein sehr leichtes Modul in Frage um nicht beim Modulwechsel Hebezeuge oder ähnliche Hilfsmittel einsetzen zu müssen.

Abb. 20: Nachbau des JH EZS 570 in der 3-Seiten-CAVE

Inbetriebnahme und Funktionstests

Währen der Inbetriebnahme des Simulators und den ersten Testläufen kam es zu zahlreichen Anpassungen an Hard- und Software. Das ursprüngliche Lenkgetriebe mit Schneckengewinde stellte sich als nicht stabil genug heraus und wurde überarbeitet. Die Mediensteuerung, die für die Ein- und Ausschaltung der Projektoren und des PC-Clusters verantwortlich ist, arbeitete sehr unzuverlässig. Durch den Einsatz von Steuerungsmodulen der Firma Korenix konnten diese Probleme aber behoben werden.

Im weiteren Verlauf der Inbetriebnahme stellten sich zahlreiche kleinere Probleme heraus, die es zu überwinden galt. Auch im Zusammenspiel des Servers mit dem Render-Cluster gab es Widrigkeiten. Das Netzwerk war durch die hohen Datenmengen stark überlastet und es kam zu Synchronisationsproblemen an den verschiedenen Leinwänden. Gelöst werden konnte dieses Problem indem die Netzwerkarchitektur komplett überarbeitet wurde und ein zweites Netzwerk integriert wurde. Durch die Aufteilung der Daten in zwei autarke Netzwerke konnte die Synchronisation sichergestellt werden.

Eine große Herausforderung war es die Simulation realitätsnah abzubilden, so dass Personen, die täglich mit Flurförderzeugen umgehen, sich in Haptik und Bedienbarkeit des Simulators zurechtfinden. Das war anfänglich nicht der Fall, konnte aber in einer Reihe von Testfahrten von Staplerfahrern und Anpassungen unsererseits behoben und zufriedenstellend gelöst werden.

Feintuning Steuerung/Software

Die Phase des sogenannten Feintunings dauerte ebenfalls länger als ursprünglich geplant. Auf Grund der Komplexität der Anlage gab es immer wieder Probleme vor allem im Zusammenspiel der Kameramatrix und des Trackingsystems. Die Aufgabenstellung ein verzerrungsfreies Bild mit perspektivisch richtiger Fluchtlinienführung in der Cave darzustellen war eine große Herausforderung, da jeder Fahrer eine unterschiedliche Größe hat und somit eine andere Augenposition. Wir konnten das Trackingsystem schlussendlich so programmieren, das der Träger der Sensoren von jedem Punkt der Cave eine einwandfreie Perspektive hat.

Weiterhin führten wir Belastungs– und Grenzwerttests durch um eventuelle Schwachstellen zu finden und passten das Sicherheitssystem den Anforderungen der Risikobewertung nach ISO 14121 an. So wurden zum Beispiel Not-Aus-Taster für Operator und Fahrer vorgesehen. Ebenso wurden die Gurtschlösser der Module mit Sensoren versehen, die den Betrieb der Bewegungsplattform nur erlauben, wenn der Fahrer ordnungsgemäß angeschnallt ist.

Abschließend wurde ein Benutzerhandbuch erstellt.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde

In dem Projekt wurde zunächst an den Stand der Technik angeknüpft, der im Antrag beschrieben wurde.

Weitere Anknüpfungspunkte waren die im Vorfeld durchgeführten Informationsgespräche und die enge Zusammenarbeit mit den Herstellern (STILL GmbH, Jungheinrich AG). Die Entwicklung der Software erfolgte – wie oben beschrieben – mit Unterstützung des Fraunhofer Instituts (IGD) in Rostock. Inhaltlich wurden die Mitarbeiter der Lernwerkstatt Logistik bei Volkswagen in Wolfsburg zu Rate gezogen.

Die im Vorfeld durchgeführte umfangreiche Recherche umfasste Themengebiete wie Motionsysteme, interaktives Lernen, 3D-Modelling, Tracking-Technologien, VR-Environment-Technologien, CAVE-Technologien (Computer Automatic Virtual Environment) und wurde durch Studien und Workshops aufbereitet.

Die langjährige Erfahrung in der Entwicklung und Produktion von Simulatoren, die die Bestsim GmbH und ihre Mitarbeiter gesammelt haben und durch ihre Ausbildungen erwarben, bildeten einen Grundstein für die Entwicklung. Die Erkenntnisse, die sich während der Entwicklung des Simulators ergaben, werden in zukünftige Projekte einfließen.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen:

Die Herausforderung eine realitätsnahe Fahrzeug- und Ladungsphysik softwareseitig darzustellen, konnte mit Unterstützung des Fraunhofer Instituts (IGD) in Rostock unter Leitung von Prof. Dr. Ing. Uwe Freiherr von Lukas erfolgreich entwickelt und zufriedenstellend abgeschlossen werden.

Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen:

Die Bereitstellung von Testfahrzeugen und Daten zu den zu simulierenden Fahrzeugen waren für eine erfolgreiche Entwicklung unabdingbar. Die Unternehmen STILL und Jungheinrich (führende Hersteller von Flurförderzeugen) unterstützten die Bestsim GmbH bei diesem Projekt und stellten Fahrzeuge, Protokolle und technisches Knowhow zur Verfügung.

Zusammenarbeit mit Bildungsstätten:

Die betriebliche Fahrschule für Flurförderzeuge der Volkswagen AG in Wolfsburg sowie die Lernwerksatt Logistik in Wolfsburg unterstützten das Projekt mit regem Erfahrungs- und Informationsaustausch.